

EXAMINAREA CU CURENȚI TURBIONARI

ISTORIC

Fenomenele electrostatice și cele magnetice au fost observate încă de acum 2500 de ani. Thales din Milet a observat că o bucată de chihlimbar, prin frecare, poate atrage obiecte mici. În limba greacă, cuvântul chihlimbar, se traduce prin "electron". Democrit a elaborat conceptele unei structuri atomice a materiei. Au trebuit însă să treacă alți 1500 de ani, pentru a fi descoperită busola, în China.

Abia acum 180 de ani, Hans Christian Oersted a făcut prima observație clară a legăturii dintre magnetism și electricitate, când a demonstrat că un curent electric care trece printr-o sârmă, afectează o busolă, aflată în apropiere.

Existența curenților turbionari, a fost demonstrată pentru prima dată, de către Jean-Bernard Leon Foucault, în anul 1830. Acesta, a demonstrat că, într-o placă de cupru sunt induși curenți electrici, dacă aceasta este mișcată într-un câmp magnetic. După numele fizicianului care i-a descoperit, curenții turbionari, mai sunt denumiți și curenți Foucault.

În anul 1832, Michael Faraday a descoperit inducția electromagnetică. James Clerk Maxwell a descris matematic câmpul electromagnetic, printr-o serie de ecuații, 50 de ani mai târziu. Pionierul în folosirea curenților turbionari la inspectarea materialelor, este considerat D.E. Huges. În 1879 el a publicat rezultatele cercetărilor sale în lucrarea "*Induction Balance and Experimental Researches Therewith*", în "*Philosophical Magazine*". Huges a folosit pentru prima dată efectul producerii curenților turbionari, de către impulsurile electrice produse de o bobină, în scopul controlării metalelor.

În 1925, C. Farrow, a folosit curenții turbionari la inspecția tuburilor din oțel pe scară industrială. După al doilea război mondial, prin anul 1954, Friedrich Forster a pus la punct metodologia analizării efectelor curenților turbionari, prin folosirea unor diagrame plane ale impedanței. Începând cu 1950, Forster a realizat instrumente care afișau semnalul impedanței plane. Aceasta a făcut posibilă deosebirea dintre defecții parametri, cu toate că procedura era încă empirică. Începând cu anul 1960, progresele teoretice și practice au făcut ca tehnologia cu curenți turbionari să treacă de la o tehnică empirică, la o disciplină acceptată de inginerie.

DEFINIȚII, TERMINOLOGIE

Inducție electromagnetică - fenomen de producere a unei tensiuni electromotoare într-un circuit, datorită variației fluxului magnetic care străbate acest circuit

Curenți turbionari - curenți locali de inducție care apar în piese metalice când acestea sunt supuse unor fluxuri magnetice variabile.

Control cu curenți turbionari - metodă nedistructivă de control bazată pe inducerea unor curenți turbionari în materialul controlat. Modificări ale câmpului magnetic generat de acești curenți datorate unor neomogenități sau discontinuități ale materialului examinat prelucrate de aparatura adecvată permit evidențierea defectelor.

Adâncimea de penetrare este adâncimea la care intensitatea unui câmp magnetic sau intensitatea unor curenți turbionari induși, scade la $1/e$ din valoarea lor de la suprafață, unde $e = 2,718$, este baza logaritmului natural.

Adâncimea de penetrare efectivă este limita adâncimii la care pot fi descoperite defecte și este de aproximativ trei ori adâncimea standard de penetrare.

Efectul pelicular ("SKIN") reprezintă distribuția neuniformă a densității de curent pe normala

la suprafața conductoarelor parcurse de curenți în regim periodic.

Sonda sau bobina diferențială este un aranjament de două bobine, unde una sau două zone ale specimenului sunt comparate cu una a unui standard de referință.

Sonda - bobina de dimensiuni reduse (sau un ansamblu de bobine) folosită pentru evidențierea defectelor locale în materialul controlat.

Factorul de umplere ("fill factor"):

- Pentru o examinare a unei suprafețe interioare, factorul de umplere este raportul dintre aria secțiunii efective a bobinei-sondă interne și aria secțiunii interioare a tubului.
- Pentru o examinare a unei suprafețe exterioare, factorul de umplere este raportul dintre aria secțiunii obiectului examinat și aria secțiunii efective a bobinei înfășurătoare primare.

Bobina interioară ("ID") este o bobină pentru examinarea unor suprafețe interioare; se introduce în interiorul pieselor.

Efectul de capăt, de margine ("edge effect") este o perturbare care se produce în câmpul magnetic, datorită unei schimbări bruște a geometriei specimenului.

Lift-off - apropiere-depărtare - este spațiul variabil dintre sondă și proba de examinat.

Efectul "lift-off" este efectul schimbării cuplării magnetice între obiectul examinat și bobina-sondă când variază distanța dintre ele.

Raportul de zgomot este raportul între indicațiile relevante și cele nerelevante. Valoarea acestui raport este de minim 3/1.

Bobină adaptată geometric - bobină cu geometrie adaptată configurației piesei de controlat.

Selectivitate - capacitatea echipamentului de control de a diferenția semnalele de defecte în funcție de natura lor.

Rezoluție - capacitatea echipamentului de control de a indica distinct semnalele provenite de la defecte învecinate.

Timp de raspuns - timpul care a trecut între momentul sesizării unui defect de către bobina secundară și indicația aparatului indicator.

Timp de restabilire - timpul necesar unui echipament de control pentru a reveni la starea inițială, după ce a primit un semnal.

Piesa de etalonare - piesa cu defecte naturale sau artificiale folosită la calibrarea echipamentului de control.

Piesa de referință - piesa executată din același material, cu aceleași caracteristici fizice și dimensiuni de bază ca și piesa controlată și care poate sau nu conține defecte naturale sau artificiale.

AVANTAJE, DEZAVANTAJE

Controlul cu curenți turbionari se bazează pe principiile inducției electromagnetice și este folosit pentru evidențierea variațiilor de proprietăți fizice, structurale și metalurgice în materiale și piese care au conductibilitatea electrică acceptabilă.

Intrucât examinarea cu ajutorul curenților turbionari este bazată pe inducția electromagnetică, aplicarea ei nu necesită un contact direct între părțile implicate în procesul de examinare. Acesta constituie un avantaj important al examinării cu curenți turbionari. Un alt avantaj, în comparație cu alte metode, este viteza mare de examinare a produsului chiar în timpul producerii lui.

Faptul că această metodă prezintă o mare sensibilitate este în același timp un avantaj și un dezavantaj (anumite variații ale proprietăților electrice ale materialului examinat nu prezintă interes din punct de vedere al funcționalității acestuia în timp, dar perturbațiile produse în sistemul de control de către aceste variații pot conduce la interpretări dificile).

Metoda este aplicabilă numai la materialele cu bune calități conductoare (metale, aliaje, materiale ce conțin în compoziție straturi de material conductor). Se pot măsura grosimile unor straturi neconductoare cu condiția ca acestea să fie depuse pe straturi de materiale conductoare. Metoda poate detecta doar acele defecte ce perturbă liniile de curent ale curenților turbionari. Așadar, vor putea fi detectate numai defectele orientate perpendicular pe aceste linii și cele orientate paralel (tangențial) la liniile de curent.

Principalele avantaje ale examinării cu curenți turbionari:

- nu necesită folosirea unui cuplant între bobina de control și obiectul controlat;
- utilizarea nu este complicată, echipamentul fiind în general de dimensiuni mici;
- este extrem de sensibil la defecte, pot fi detectate defecte de 1 mm³;
- asigură reproductibilitatea rezultatelor examinării;
- permite scanarea obiectului cu o viteză mare, ceea ce duce la rezultate considerate instantanee;
- asigură o sensibilitate foarte bună în analiza dimensională a defectelor sau a grosimii învelișului.

Principalele dezavantaje sau limite ale examinării cu curenți turbionari:

- interpretarea rezultatelor depinde de pregătirea operatorului (este necesară o bună pregătire teoretică: matematică și electrotehnică);
- este o metodă extrem de sensibilă la variațiile suprafeței și de aceea cere o bună calitate a suprafeței;
- apar complicații la controlul materialelor feromagnetice (poate fi folosit la materialele nemagnetice și magnetice; nu se obțin rezultate bune la examinarea oțelului carbon în scopul detectării defectelor de suprafață);
- detectarea defectelor poate fi influențată de mulți parametri, precum adâncimea fisurii și orientarea curenților turbionari în raport cu poziția unui defect sau a unei discontinuități liniare.

PRINCIPIUL METODEI

Procesul de control nedistructiv cu curenți turbionari scoate în evidență modificările proprietăților fizice ale unui obiect controlat cu ajutorul unui câmp magnetic alternativ sau în mișcare. Practic, piesa controlată este adusă în zona de interacțiune cu un câmp magnetic alternativ produs de o bobină. Câmpul bobinei de control induce în piesa curenți turbionari care la rândul lor produc un câmp magnetic alternativ opus câmpului bobinei. Modificări ale câmpului magnetic generat de acești curenți datorate unor neomogenități sau discontinuități ale materialului controlat preluate de aparatul adecvat permit evidențierea defectelor în materialul controlat. Testarea depinde de aranjamentul de măsură, de frecvență, de proprietățile electrice și magnetice, precum și de dimensiunile piesei.

Metoda se bucură de un larg câmp de aplicatii: în defectoscopie, în recepția și sortarea semifabricatelor, evidențierea modificărilor superficiale de suprafață, măsurări de grosimi, la examinarea semifabricatelor din fibra de carbon sintetic întâlnite în aviație și tehnici aerospațiale. Ea se aplică atât pentru materiale feromagnetice cât și pentru materiale neferomagnetice. Adâncimea de patrundere fiind destul de mică metoda este indicată în cazul controlului defectoscopic de mare finete, domeniul de sensibilitate situându-se în limitele 0.01mm - 1mm, frecvența de lucru fiind între 10Hz și 10MHz.

Metoda de control cu curenți turbionari, ar putea fi descrisă ca o interacțiune între mai multe discipline ca: fizica teoretică, inginerie electrică, electronică și metalurgie.

Până nu de mult, tehnica de control cu curenți turbionari a fost folosită numai în industria materialelor metalice. În ultimele decenii, ea a început să fie folosită și în industria aerospațială și nucleară. Ca și celelalte metode de control nedistructiv, încercările cu curenți turbionari, permit măsurarea proprietăților materialului și dimensiunilor sau detectarea discontinuităților. În general, controlul cu curenți turbionari furnizează rezultate ale măsurătorilor aproape instantaneu.

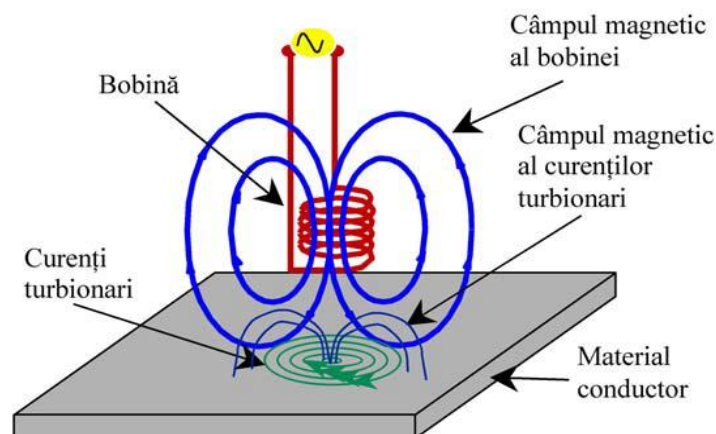


Fig. 1 Producerea curenților turbionari

În baza legii inducției, într-o piesă bună conductoare de electricitate se introduc curenți turbionari prin câmpuri magnetice variabile sau în mișcare realizate cu ajutorul unei bobine de excitație (fig 2). Potrivit legii lui Lentz câmpul magnetic primar produs de bobina H_p , și cel secundar indus în piesă de către curenții turbionari H_s , se află în interdependență și în opoziție. Curenții turbionari ocolesc discontinuitățile din piesă, astfel încât modifică fie impedanța bobinei, dacă traductorul este format dintr-o singură bobină de excitație, fie amplitudinea și faza curentului din bobina secundară, atunci când traductorul este format din două bobine.

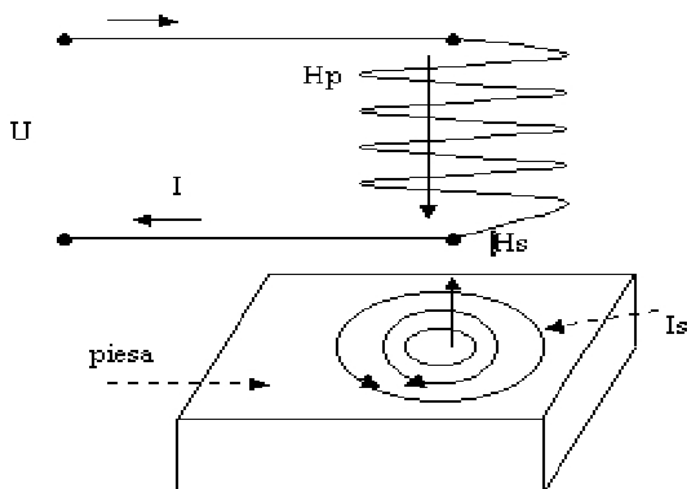


Fig. 2 Curenți turbionari și câmp magnetic indus în piesă de controlat
Principalii factori care influențează metoda de control cu curenți turbionari sunt:

- efectul pelicular;
- frecvența;
- permeabilitatea magnetică;
- conductivitatea electrică;
- distanța conductor – piesă;
- efectul de magne.

Efectul pelicular se evidențiază atunci când într-o piesă se induce un curent alternativ. Este un fenomen de descreștere a patrunderii curentului spre centrul conductorului odată cu creșterea frecvenței curentului. În cazul unor frecvențe mari, curentul rămâne practic la suprafață. La suprafața acesteia densitatea de curent este maximă, iar la mijlocul piesei, minimă. Legea de distribuție a curentului în secțiunea transversală este de formă exponențială:

$$I = I_0 \cdot e^{-x(\pi f \mu \lambda)}$$

unde I_0 este densitatea de curent de suprafața, x este distanța în planul transversal al piesei sau adâncimea de patrundere, f este frecvența, μ_r permeabilitatea relativă iar λ conductivitatea electrică ($m/\Omega \text{ mm}^2$).

Adâncimea de patrundere a , se definește ca fiind acea adâncime până la care intensitatea curenților turbionari este suficient de mare, pentru a putea evidenția defectele. Ea reprezintă o treime (cca. 37%) din valoarea sa la suprafața unui corp cu configurația uniformă.

$$a = \frac{503}{(\mu_r f \lambda)^{1/2}}$$

Presupunem că avem de controlat două piese de dimensiuni identice, dar care au conductivități electrice diferite (cupru și oțel). Pentru a obține aceeași adâncime de patrundere, suntem obligați să folosim frecvențe diferite, compensând astfel diferența de conductivitate.

Frecvența diferă și ea în funcție de materialul controlat. Ea influențează direct proporțional reactanța inductivă a circuitului. Domeniul de frecvențe este foarte larg, începând cu spectrul undelor radio până la limitele microundelor. Cele mai utilizate benzi de frecvență sunt cuprinse în intervalul 1 - 500 kHz.

Permeabilitatea magnetică joacă un rol deosebit asupra curentului indus în piesă, ea variind în funcție de câmpul magnetic și este mult superior rolului conductivității electrice. Tehnica de saturare elimină pe de o parte influența permeabilității, iar pe de altă parte efectul de încălzire în curent alternativ.

Coefficientul de conductivitate este dependent de o multitudine de factori ce țin de material și de prelucrarea acestuia, dintre care cei mai importanți sunt: tratamentul termic aplicat, dimensiunile granulației, temperatura, tensiuni interne de ordin doi, variațiile unor caracteristici reologice.

Pe măsura apropierii bobinei de control de piesă de examinare, impedanța suferă modificări, cu atât mai mari cu cât proximitatea - distanța față de piesă este mai mică și cu cât câmpul magnetic produs de bobină este mai mare. Coeficientul de umplere al bobinei reprezintă gradul de ocupare al secțiunii acesteia de către secțiunea transversală a piesei:

$$\eta = \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2$$

DOMENIU DE APLICABILITATE

Aplicații ale inspecției prin curenți turbionari

Examinarea cu curenți turbionari poate fi folosită la:

- detectarea defectelor de suprafață și din interior, în apropierea suprafeței materialelor conducătoare;
- măsurarea conductivității componentelor metalice;
- măsurarea grosimii unui înveliș neconducător, cum ar fi vopseaua, de pe o suprafață conducătoare.

Cele mai multe dispozitive de inspecție prin curenți turbionari sunt concepute dedicat pentru un anumit tip de inspecție, cum ar fi detectarea fisurilor (crack-urilor), inspectarea tuburilor, sortarea metalelor sau determinarea grosimii acoperirilor sau a conductivității. Există, de asemenea, și dispozitive multiscop în care sunt urmărite modificările în modulul și faza impedanței. Piesele inspectate sunt țevi, bare, tuburi și sârme.

Fisuri (Crack-uri) desuprafață

Detectarea discontinuităților de suprafață (crack-uri) sau a celor de interior necesită luarea în considerare a următoarelor aspecte practice:

Este importantă luarea în considerare a oricăror cunoștințe inițiale despre tipul probabil al defectului, poziția, orientarea și numărul probabil de defecte.

Alegerea frecvenței de alimentare va influența detectabilitatea. Pentru defecte de suprafață, frecvența ar trebui să fie cât mai mare posibil pentru a asigura o rezoluție maximă și sensibilitate ridicată. Pentru defectele încapsulate (embedded) sunt necesare frecvențe joase, conducând la sensibilitate scăzută. Pentru materialele feromagnetice, alegerea unei frecvențe scăzute poate anula într-o bună măsură penetrarea scăzută (datorată valorilor mari ale permeabilității magnetice).

Este avantajoasă utilizarea unei sonde (sistem senzor și excitație) care să se potrivească cu geometria piesei inspectate. La începutul inspecției, sonda trebuie plasată în vecinătatea suprafeței. Se notează impedanța în acest moment. Se face corecția de zero a instrumentului. La deplasarea sondei deasupra piesei de inspectat, o modificare în impedanță înseamnă trecerea sondei peste o discontinuitate.

Semnalele provenind de la fisuri (crack-uri) situate la diferite adâncimi depind de frecvența și de geometria sondei folosite, precum și de conductivitatea și permeabilitatea magnetică a piesei inspectate. Este important, pe tot timpul inspecției, să se mențină un același lift-off, unghi al sondei față de piesa de inspectat și aceeași viteză. Este deci necesară utilizarea de dispozitive automate de scanare. Instrumentele ar trebui calibrate inițial prin măsurători asupra unor defecte artificiale produse în materiale de proprietăți cunoscute.

Coroziunea

Coroziunea este un proces natural și reprezintă rezultatul tendinței metalelor de a trece în stare mai stabilă din punct de vedere chimic, și anume oxizii. Cele mai multe coroziuni se găsesc în natură în minereuri, care sunt amestecuri de compuși chimici diferiți.

În procesul de extracție, apare un surplus de energie în vederea obținerii metalului. Surplusul de energie constituie factorul ce activează procesul de coroziune - de revenire la procesul stabil reprezentat de oxizi.

Diferite tehnici de curenți turbionari sunt folosite pentru caracterizarea defectelor (thinning) a materialelor - induse prin coroziune - la îmbinările din fuselajele lor. Sunt utilizate, în special, două metode: una de baleiere în frecvență și o alta ce utilizează curenți turbionari în impulsuri.

Prima metodă se bazează pe măsurarea impedanței sondei - la o serie de frecvențe ale semnalului. Analiza datelor în procesul de inversie furnizează date cantitative despre grosimea straturilor ce se întâlnesc într-o îmbinare. Informații similare pot fi obținute prin testare cu curenți turbionari în impulsuri, dar mai rapid și cu un cost mult mai scăzut.

Tehnici multifrecvență

Impedanța unei sonde de curenți turbionari poate fi afectată de o serie de factori, printre care:

- Variații ale frecvenței de alimentare;
- Variații ale conductivității electrice și permeabilității magnetice ale unui obiect sau structuri cauzate de modificări în structura materialului, apărute ca efect al tratamentelor termice, structurii cristaline etc.
- Modificări ale lift-offului datorate vibrațiilor sondei, asperităților suprafeței de testat și excentricității tuburilor datorate, în speță, fabricației defectuoase.
- Prezența defectelor de suprafață, cum ar fi crack-urile, și a celor interioare (de sub suprafață), cum ar fi golurile sau incluziunile nemetalice.
- Modificări dimensionale, ca de exemplu, subțierea pereților tuburilor datorită coroziunii, depunerii de material conductor etc.
- Prezența suporturilor metalici exteriori (în cazul tuburilor).
- Prezența unor discontinuități, cum ar fi muchiile ascuțite.

Determinarea adancimii fisurii cu sonde de potential

Sondele de potential permit nu numai detectarea defectului dar și determinarea adancimii fisurii. Ele semnalizeaza variatia caderii de tensiune intre doua puncte invecinate situate pe suprafata examinata in prezenta defectului, comparativ cu situatia de referinta cand piesa este lipsita

de defecte. În paralel, datorită, pe de o parte, preciziei de măsurare a diferenței de potențial, iar pe de altă parte, proporționalității dintre căderea de tensiune și lungimea traiectoriei liniilor de curent între două puncte situate pe suprafața piesei, devine posibilă determinarea cu suficientă acuratețe a adâncimii fisurii.

Defectoscopia cu sonde de potențial este cu atât mai eficientă cu cât materialul examinat este mai dur din punct de vedere magnetic, deoarece permeabilitatea acestuia, comparativ cu a materialului feromagnetic, este mai puțin influențată de tensiunile interne induse în procesul de prelucrare mecanotermică. Domeniul cel mai întâlnit de aplicații îl reprezintă controlul țevelor de diametre și grosimi relativ mari. Din punct de vedere al adâncimii fisurii, metoda permite o investigare cantitativă de precizie în intervalul 4 - 20 mm.

Detectarea discontinuității și evaluarea adâncimii

Semnalația fisurii și evaluarea adâncimii ei se realizează cu ajutorul sondelor de potențial de contact cvadri sau hexapolare de curent continuu și/sau alternativ. Sonda are o pereche de poli A - B, cu deschidere l , figura 2, servind ca electrozi de contact pentru inducerea curentului în piesă și o pereche de poli, C, D cu deschidere mai mică $l_0 < l$, utilizați la măsurare cu ajutorul unui galvanometru. Presupunând că prin electrozii A și B se introduce în interiorul piesei un curent continuu de intensitate i , având liniile de curent și cele echipotențiale reprezentate în figura 2.a), diferența de potențial între punctele C și D în cazul absenței defectului este dată de relația:

$$U_0 = R \cdot i = \rho \frac{l_0}{S} \cdot i$$

unde ρ este rezistivitatea materialului; S este secțiunea străbătută de curentul i ; l_0 este distanța minimă străbătută de curent între sondele de potențial (C, D).

Dacă între punctele de măsurare C și D există o fisură, liniile de curent sunt obligate să ocolească fisura, modificând și configurația liniilor echipotențiale, figura 2.b).

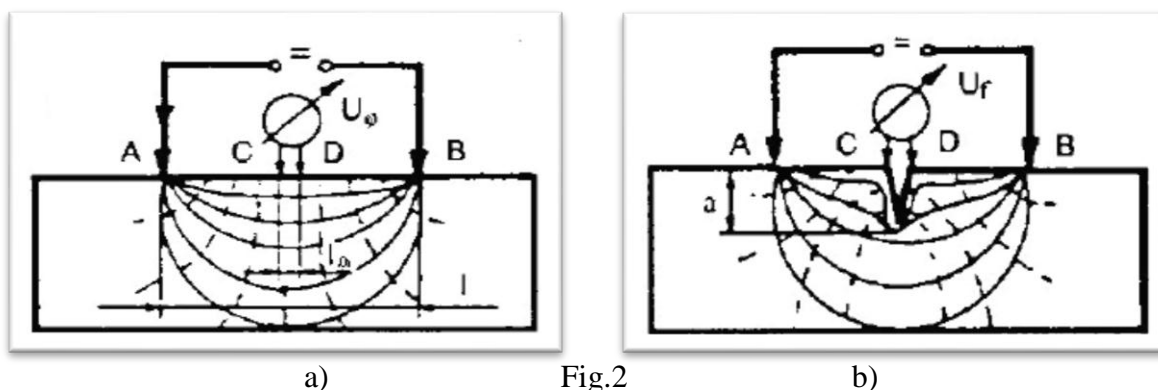


Fig.2 Liniile de curent și echipotențiale în zona de măsurare cu sondele de potențial C-D

- a) Într-o piesă fără discontinuități superficiale
- b) Într-o piesă cu fisură de adâncime „a”

Ocolind fisura, liniile de curent parcurg o distanță l_f mai mare, ceea ce corespunde unei rezistențe mai mari, $R_f > R$. Astfel, diferența de potențial măsurată păstrând același curent ca și în primul caz va fi și ea mai mare și anume:

$$U_f = R_f \cdot i = \rho \frac{l_f}{S} \cdot i$$

Unde l_f este lungimea liniei medii de curent ce înconjoară fisura.

În cazul când: $S = S'$ rezulta:

$$\frac{U_f}{U_0} = \frac{I_f}{I_0} = f\left(\frac{a}{l}\right)$$

Funcția fiind deci dependentă de adâncimea fisurii (a).

Tehnologia de control

Controlul cu sonde de potențial de contact implică testarea din aproape în aproape a zonei de interes de pe suprafața piesei și urmărirea instrumentului de măsură. În raport cu direcțiile posibile de orientare a defectelor, sondele se așază astfel încât unghiul format de linia electrozilor de contact cu planul fisurii să fie cât mai mare. Înainte de începerea examinării este necesară o calibrare de nul a aparatului. Polii de măsurare se mențin în contact cu suprafața și perpendicular pe aceasta. Pentru mărirea concludenței măsurării, apăsarea constantă a polilor de contact se asigură printr-o montură prevăzută cu arc. Abaterea măsurătorilor, determinată de poziția polilor, se încadrează în limitele $\pm 10\%$. În mod asemănător, precizia de măsurare a adâncimii fisurilor cvasiperpendiculare se încadrează în limite de $\pm 10\%$, dacă diferența dintre grosimea piesei și adâncimea fisurii depășește ca mărime distanța l . Defectele înclinate provoacă abateri peste limitele $\pm 10\%$, mai ales atunci când adâncimea este sub 5 mm. La examinarea pieselor subțiri, se impune folosirea unor coeficienți de corecție stabiliți în funcție de unghiul de înclinație [12]. Se menționează că lățimea defectului nu influențează rezultatul măsurătorii.

Având în vedere sensibilitatea metodei față de variații de formă, rezultatele determinărilor se consideră concludente dacă distanța dintre punctul de măsurare și zona cu modificări de secțiune a piesei depășește deschiderea l dintre electrozi. După sesizarea defectului, se va căuta simetrizarea polilor în raport cu planul defectului.

Aparatele cvadripolare se livrează în varianta $3 \div 1$, având două capete de măsurare și un pol de curent în aceeași montură și celălalt pol de curent cu magnet de fixare mobil separat, racordat cu cablu flexibil pentru a permite o mai bună adaptare la situațiile care pot să apară în cursul controlului. Alegerea și, după caz, reglarea distanței dintre capetele polare de măsurare se face cu ajutorul unor defecte artificiale localizate pe suprafața posterioară. Sensibilitatea de detectare a fisurilor este la nivelul micronegularităților, motiv pentru care se impune și o curățire mecanică adecvată a suprafeței examinate. Pentru mărirea preciziei de determinare la piese subțiri, se recomandă folosirea sondei hexapolare.

Controlul mecanizat al țevelor, recipientelor și vaselor cu pereți subțiri sau groși, se realizează cu ajutorul sondelor potențiale de contact sau de proximitate. În acest caz, sondele se folosesc în exclusivitate la detectarea câmpului de dispersie, respectiv la măsurarea adâncimii. În vederea obținerii unei productivități ridicate se utilizează mai frecvent următoarele soluții:

- rotirea sondelor cu turația n_s , concomitent cu o deplasare a semifabricatului (produsului), cu viteza v_d ;
- deplasarea pe generatoare a sondelor cu viteza v_d , concomitent cu rotirea produsului n_p .

În primul caz, distanța dintre capetele polare în ipoteza unei baleieri integrale a suprafeței exterioare cu un număr de n sonde, se alege din condiția:

$$I_0 = \frac{v_d}{n \cdot n_s}$$

În cel de-al doilea caz, viteza de deplasare a celor n sonde paralele în ipoteza baleierii integrale a suprafeței se afla din relația:

$$v_d = n_p \cdot I_0$$

Principala deficiență a sondei de proximitate constă în dependența gradului de decelabilitate a câmpului de dispersie de distanța până la suprafața de examinare (întrefier), ceea ce îi limitează posibilitățile de aplicare. Rezultatele măsurătorilor sunt influențate de temperatură datorită în primul rând dependenței rezistivității de acest factor.

Alți factori care pot provoca erori sistematice de măsurare a discontinuităților sunt existența unor punți de legătură electromagnetică între suprafețele discontinuității, ca și prezența lichidului, ceea ce prin scurtcircuitarea liniilor de curent, conduce la subestimarea adâncimii.

Precizia măsurătorilor de potențial este influențată de grosimea piesei și de distanța dintre locul de măsurare și marginea piesei. Pentru obținerea unei precizii de $\pm 10\%$ la măsurarea adâncimii fisurii, grosimea piesei s , respectiv grosimea efectivă sub fisură ($s - a$), trebuie să depășească distanța dintre electrozii de curent.

Metoda se poate utiliza la toate materialele bune conducătoare de electricitate. Aparatele de c.c. compensează automat variațiile de tensiune produse de contactul electrozilor pe piesă și datorită temperaturii de contact. Sondele de măsurare sunt realizate, în funcție de lungimea l_0 și curentul i , de la diametre de $0,1 \div 5$ mm, până la diametre de $0,5 \div 50$ mm, respectiv curenți în intervalul $3 \div 20$ A. Rezultatele sunt prezentate analogic sau digital și se pot înregistra.

PARTICULARITĂȚILE CONTROLULUI NEDISTRUCTIV CU CURENȚI TURBIONARI

Măsurarea conductivității materialelor

Măsurarea conductivității unui metal neferomagnetic este destul de simplă, fie că este vorba de valori absolute pentru materiale omogene sau relative pentru obiecte conținând modificări structurale (cum ar fi tratamente termice aplicate în anumite puncte). Principiul măsurătorii se bazează pe variația impedanței senzorului la modificarea conductivității materialului testat la o frecvență fixă și în condițiile păstrării nemodificate a distanței senzor-piesa.

Instrumentele folosite exclusiv pentru măsurarea conductivității sunt, în general, simple și folosesc senzori de diametru mare (10 mm sau mai mult), de obicei de tipul bobină plată. Au, de obicei, numai câteva trepte de frecvență (de exemplu 5 și 10 kHz), funcție de adâncimea de pătrundere cerută, cu un indicator pentru afișarea semnalului de ieșire și un schimbător de fază pentru eliminarea (diminuarea) efectelor lift-offului (aceasta este o caracteristică esențială în testarea materialelor cu suprafață rugoasă). Aparatul de afișaj este calibrat folosind piese test de valori cunoscute ale conductivității electrice.

O soluție alternativă pentru un instrument cu afișaj de tip osciloscop este să se observe curba la un anumit lift-off și o frecvență dată obținută prin scanarea suprafeței piesei. Rezultatul se compară cu curbe obținute pe materiale cu conductivitate cunoscută, prin trasare pe un același grafic. Metoda are avantajul că nu necesită eliminarea efectului lift-offului asupra măsurătorilor.

Măsurarea grosimii (în materialele subțiri)

Prin testarea cu curenți turbionari, pot fi măsurate următoarele tipuri de dimensiuni:

- Dimensiunile secțiunii transversale a tuburilor și barelor cilindrice;
- Grosimea unor plăci și folii metalice și a acoperirilor metalice pe substraturi metalice sau nemetalice;
- Grosimea acoperirilor nemetalice pe substraturi metalice.

Dimensiunile tuburilor și barelor cilindrice pot fi măsurate fie cu bobine exterioare - ce înconjură piesele, fie cu bobine interioare - introduse cu axe paralele cu axa tubului.

Relații dintre variația impedanței și variația diametrului este relativ constantă într-o plajă largă de frecvențe (nu foarte joase). De altfel, avantajele folosirii unor frecvențe ridicate sunt multiple. Pe de o parte, contribuția oricărei modificări de conductivitate la impedanța bobinei devine mai puțin importantă, și poate fi oricum eliminată. Pe de altă parte, se înregistrează o creștere a conductivității datorată valorii sporite a componentei inductive a impedanței. Datorită diferenței semnificative în faza semnalului, corespunzătoare unor modificări ale lift-ului conductivității și funcție de forma defectului, se pot face testări simultane pentru măsurarea conductivității, a grosimii și atestarea prezenței defectelor.

Aplicațiile uzuale includ măsurarea excentricităților în raport cu diametrele tuburilor și grosimea pereților tuburilor.

O utilitate deosebită au măsurătorile grosimii pereților tuburilor pentru detectarea coroziunii, atât a celei externe cât și a celei interioare. Atunci când suprafața interioară nu este accesibilă, trebuie folosiți senzori interiori, ca de exemplu, în testarea tuburilor îngropate sau care sunt susținute de suporturi. Rezultate bune în măsurarea modificărilor de grosime în tuburi feromagnetice au fost obținute prin folosirea tehnicii de inspecție în câmp îndepărtat.

Este posibilă măsurarea grosimii unui strat subțire de metal depus pe un substrat,

deasemenea metalic, atunci când curenții turbionari pătrund complet toată acoperirea stratul și substratul metalic, cu condiția existenței unei diferențe apreciable între cele două valori de conductivitate.

Din nefericire, efectele conductivității electrice σ nu pot fi eliminate și este important să se verifice că orice variații ale lui σ în zona de interes au efecte scăzute asupra semnalului. La frecvențe de testare scăzute, la care penetrarea este mare, variațiile de impedanță a senzorului sunt mult mai sensibile la modificări ale conductivității electrice. Se realizează, în prealabil, calibrare pe piese test de grosime cunoscută.

Detectarea și analiza semnalelor din testarea cu curenți turbionari

Curenții turbionari induși într-un material determină propriul lor câmp magnetic. Amplitudinile, fazele și forma liniilor de curent în material sunt detectate prin măsurarea câmpului magnetic rezultat sau al unui efect al său, cu un set de bobine senzor sau cu elemente de tip Hall, toate fiind integrate în sistemul de testare.

Configurațiile posibile ale sistemelor de inspecție sunt:

- a) Bobina de inducție (furnizând câmpul magnetic variabil în timp) și bobina de măsură - cea în care se observă influența curenților turbionari. Acest sistem de bobine poate fi situat de aceeași parte a piesei inspectate (tuburi, plăci) sau de o parte și de alta (în cazul foliilor subțiri) când se formează un sistem de măsură bazat pe pătrunderea prin întreg materialul a câmpului datorat curenților turbionari.
- b) Bobina de inducție este una și aceeași cu bobina de culegere a semnalului.

În cele mai multe dintre situații (pentru configurațiile de tip a), bobina de magnetizare și cea de captare a semnalului sunt de dimensiuni aproape identice. Există însă și aranjamente cu două sau mai multe bobine de excitație sau două sau mai multe bobine senzor dispuse în locuri diferite, în general, în configurații diferențiale. Astfel de montaje sunt sensibile la defecte de dimensiuni mici sau la variații mici în proprietățile materialului. Sunt larg utilizate în detectarea neomogenităților, discontinuităților sau a defectelor de sudură în tuburi, bare, plăci în timpul fabricației. În sistemele cu senzori Hall, dimensiunile reduse ale acestora permit ca o întreagă matrice de senzori să poată fi asociată cu o singură bobină de excitație.

Semnalele măsurate sunt, de obicei, tensiuni și curenți sinusoidali (sau în impulsuri). Tehnicile utilizate sunt asemănătoare cu cele folosite la măsurarea impedanțelor în circuitele de curent alternativ (în care există metode foarte precise de măsurare a amplitudinii și fazei acestora).

De asemenea, trebuie remarcat că un același sistem de testare cu curenți turbionari poate fi folosit la diverse măsurători prin selectarea de diverse frecvențe de lucru. Cele mai multe sisteme industriale funcționează cu frecvențele curentului de excitație situate în intervalul 5 Hz - 10 MHz. Cele mai multe sisteme sunt echipate fie cu oscilatoare de frecvență variabilă fie cu generatoare în trepte de frecvență.

O trăsătură esențială a testelor cu curenți turbionari este aceea că prin folosirea unei excitații în curent alternativ, curenții turbionari induși tind să se concentreze spre suprafața materialului din partea unde se găsesc bobinele de excitație. La acest fenomen contribuie conductivitatea electrică foarte mare a materialelor conductoare și permeabilitatea magnetică a acestora, așa cum am văzut din relația adâncimii de pătrundere.

Se observă că în cazul menținerii aceluiași material, prin selectarea de diferite frecvențe, se pot obține diferite adâncimi de inspecție. De asemenea, se observă că la un material bun conductor care este și feromagnetic, adâncimea de pătrundere scade substanțial comparativ cu a unui material care este doar bun conductor din punct de vedere electric. O soluție folosită pentru a evita astfel de probleme la materialele feromagnetice este o frecvență foarte scăzută (5 Hz) combinată uneori și cu trecerea prealabilă prin piesă a unui curent continuu de natură să aducă materialul testat în zona de saturație magnetică (caz în care μ tinde către 1).

Alegerea frecvenței de excitație este făcută nu doar în vederea descoperii de defecte situate la diverse adâncimi, ci și pentru măsurarea unor proprietăți de material. Se poate alege o frecvență suficient de mare pentru ca pătrunderea în material a curenților turbionari să fie foarte mică, și deci influența geometriei piesei să fie neglijabilă. De exemplu, cu frecvențe de 64 kHz se pot măsura cu precizie piese în care grosimea totală depășește 3 mm. În cazul în care se dorește măsurarea unor defecte situate pe partea opusă bobinei de inspecție, o soluție evidentă este fixarea unei frecvențe cât

mai reduse.

Inductivitatea mutuală - baza inspecției prin curenți turbionari

Bobina de testare este alimentată în curent alternativ. Când aceasta bobină este adusă în vecinătatea piesei conductoare, în ea sunt induși curenți turbionari. Prin bobina de test se produc liniile de câmp magnetic proprii cât și cele ale câmpului magnetic (opus) de curenții turbionari induși în piesă. Acest fapt duce la modificarea impedanței și o scădere a tensiunii. Diferența dintre câmpul primar (al bobinei) și câmpul secundar (al curenților turbionari) furnizează baza pentru extragerea informației în metoda testării prin curenți turbionari.

Adâncimea de pătrundere

Curenții turbionari circulă pe trasee închise - vârtejuri - în plane perpendiculare pe circuitul magnetic. Ei sunt situați, în genere, în plane paralele cu spirele bobinei inductoare plasate de asemenea, paralel cu suprafața piesei în care sunt produși. Zona de curgere a acestor curenți este limitată la zona în care există câmpul magnetic inductor. Curenții turbionari se concentrează aproape de suprafața piesei ce este vecină cu bobina de excitație. Adâncimea până la care acești curenți pătrund descrește cu creșterea suprafeței și depinde de proprietățile de material ale piesei inspectate.

Așa cum se știe, expresia intensității câmpului electric/magnetic ce pătrunde într-un conductor masiv, scade exponențial către capatul conductorului pe direcția perpendiculară pe direcția de pătrundere.

Pentru această scădere este caracteristică mărimea $\delta - l/k$, căci ea reprezintă distanța la care intensitatea câmpului scade de e ori, adică la aproximativ 36.9% din valoarea ei la suprafața conductorului. Această distanță este adâncimea de pătrundere.

Valoarea ei este deci:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma\mu\omega}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}}$$

Relația este valabilă în cazul unui câmp de excitație cu variație sinusoidală. Deși relația este dedusă pornind de la analiza pătrunderii câmpului electromagnetic într-un semispațiu conductor infinit, ea poate fi aplicată și în cazul pieselor plane de dimensiuni relativ mari ale grosimii în raport cu adâncimea de pătrundere, respectiv la tuburi, în măsura în care raza exterioară este de cel puțin câteva ori mai mare decât δ . Pentru a putea avea o aproximare a ordinului de mărime, pentru cupru, adâncimea de pătrundere funcție de frecvență este dată de :

$$\delta_{Cu} = \frac{6,62}{\sqrt{f}} [cm]$$

Curenții turbionari care circulă prin piesa testată la o adâncime anume produc câmpuri magnetice ce se opun câmpului inductor, reducând astfel fluxul magnetic total și provocând o scădere a curentului pe măsură ce crește adâncimea. Altfel spus, curenții turbionari din vecinătatea suprafeței pot fi priviți ca ecranând câmpul magnetic al bobinei și deci slăbind câmpul magnetic la adâncimi mai mari și reducând și curenții induși. Sensitivitatea la defecte depinde de densitatea curenților turbionari la locul defectului. Deși acești curenți penetrează mai mult decât o adâncime de pătrundere, intensitatea lor scade rapid cu adâncimea. La o adâncime de 26, densitatea curenților turbionari scade la 13.5% față de cea de la suprafața piesei, iar la o adâncime 36 intensitatea curenților turbionari este de doar 5% din cea de la suprafață.

Sensitivitatea la defecte situate sub suprafața piesei depinde evident și ea de densitatea curenților la acea adâncime. Este important, de aceea, să cunoaștem adâncimea de pătrundere efectivă. Aceasta este definită, arbitrar, ca fiind adâncimea la care densitatea curenților turbionari scade la 5% din densitatea la suprafața piesei. Pentru piese de grosime mare - această adâncime este de aproximativ trei adâncimi de pătrundere.

Defazajul standard

Defazajul produs de un defect depinde atât de amplitudinea cât și de faza curenților ce sunt deviați de respectivul defect. Un mic defect de suprafață, ca și un defect intern de dimensiuni mari, pot avea un efect similar asupra modulului impedenței bobinei de test. Totuși, datorită creșterii defazajului cu creșterea adâncimii, va exista o diferență clară în privința fazorului impedenței. Acest efect permite determinarea localizării și a întinderii de defect.

Un curent turbionar ce circulă la o adâncime egală cu adâncimea de patrundere este defazat (întarziat) față de curentul ce circulă la suprafață cu 57° . La o adâncime de patrundere 25, defazajul a crescut la 114° .

Defazajul este parametrul care face posibilă determinarea adâncimii unui defect. Permite, de asemenea, distingerea între semnalele de la un defect și indicațiile false. Este parametrul fundamental în testarea cu curenți turbionari.

Proprietăți de material ce influențează testarea cu curenți turbionari

Cele trei caracteristici ce determină, în mod esențial, curenții turbionari induși sunt:

- Conductivitatea electrică;
- Permeabilitatea magnetică;
- Prezența, geometria și caracteristicile de material (a și n) ale defectului.

Valoarea conductivității unui metal depinde de o serie de factori printre care compoziția chimică, natura structurii sale cristaline, proprietățile mecanice și temperatura. Când sunt folosiți curenți turbionari pentru a măsura conductivitatea metalului, este important, pentru corectitudinea rezultatului, să se țină sub observație anumiți factori.

Testele cu curenți turbionari pot pune în evidență variații în conductivitatea electrică legată de compoziția aliajelor, variații de temperatură.

Se pot pune în evidență efectele coroziunii sau fisuri apărute în timpul testării pentru majoritatea metalelor și a aliajelor nemagnetice. În cazul materialelor magnetice (de exemplu oțelurile), efectele unor procese termice sau mecanice (proprietățile elastice, duritatea etc) pot fi, de asemenea, detectate. Totuși, în aceste cazuri, anomalii în semnalele obținute datorate de eventuale magnetizări anterioare ale piesei pot îngreuna interpretarea rezultatelor ce rezultă la proprietățile de material inspectate.

Metode de tip reflexie (pentru detecția fisurilor)

Pentru detecția fisurilor, cel mai simplu tip de sondă este cel constituit dintr-o singură bobină (pentru excitație și măsură) - utilizat pe scară largă la ora actuală. Uneori, este preferabil, să folosim o sondă constând din două (sau mai multe) bobine așezate ca un transformator - de unde și numele de sondă transformator. Bobina primară induce curenți turbionari în piesa de test iar bobina secundară acționează ca detector.

Când este necesară patrunderea semnalului pe întreaga grosime a plăcii sunt folosite și sisteme de tip transmisie. Sondele cu reflexie (excitație/senzor) au o înfășurare primară prin care circulă curentul provenind de la oscilator și una sau mai multe bobine conectate la circuitul de măsură. În funcție de configurația bobinelor senzor, sondele de tip reflexie pot da măsuri echivalente cu o sondă absolută sau diferențială. Principalele avantaje ale sondelor de tip reflexie sunt:

- Bobina de excitație și cea senzor pot fi separat optimizate pentru funcțiile lor.
- Bobine de excitație mai mari furnizează un câmp mai uniform, conducând la o patrundere mai bună și la caracteristici de lift-off îmbunătățite.

Clasificarea bobinelor pentru control

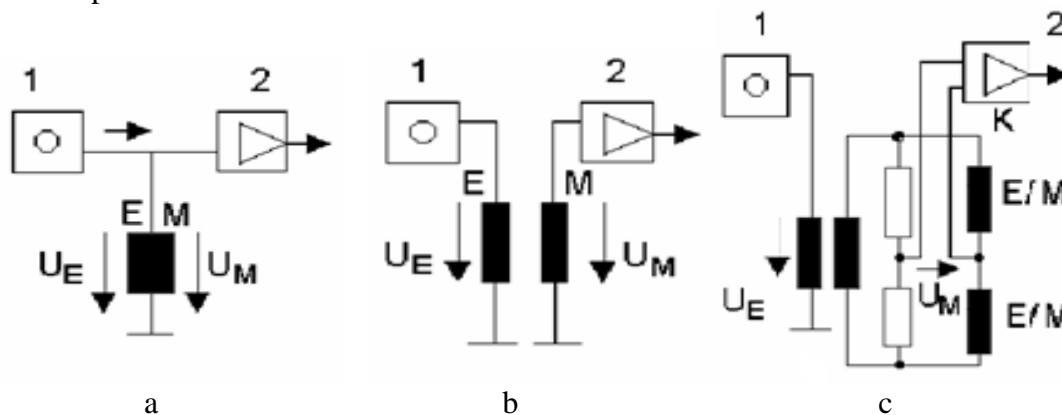
Curenții turbionari sunt generați de sisteme de frecvență sinusoidală constantă, de sisteme de frecvențe multiple, de sisteme de impulsuri și de sisteme în mișcare de rotație.

Cuplarea electrică a bobinelor este de trei feluri:

- parametrică - unde excitarea câmpului magnetic și măsurarea se fac cu una și aceeași bobina, (fig 3.a)
- de tip transformator - excitarea și măsurarea se realizează cu două bobine separate, (fig 3. b)
- de tip punte - excitarea și măsurarea se face cu două bobine care fac parte dintr-o punte. (fig 3. c)

Componentele schemelor din figura 3 sunt:

1 - modulul de generare, care furnizează curentul de amplitudine constantă;
 2 - treapta de intrare a aparatului de măsură, E – bobina de inducere a curentului turbionar;
 M - bobina de măsurare;
 K - bobina de compensare.



Variante ale circuitelor electrice ale bobinelor

a. parametric, b. tip transformator, c. tip punte

Traductoarele (bobinele) ofera o mare varietate de forme in functie de configuratia piesei. Astfel, se cunosc:

- Bobine de trecere exterioare - bobine inelare care circumscriu piesa controlata. Se folosesc la controlarea pieselor dispuse pe lungime: bare, tevi, sarme.
- Bobine de trecere interioare - folosite pentru piese de forme tubulare pentru inspectarea orificiilor lungi, conductelor si tevilor.
- Bobine de transmisie axiale - formate dintr-un cuplu de doua bobine axiale, una exterioara, cealalta interioara. Ele cuprind piesa sau peretele piesei.
- Bobine de contact - se aplica pe o mica parte a piesei fiind foarte mici in comparatie cu aceasta.
- Bobine de transmisie perpendiculare - formate dintr-un cuplu de doua bobine axiale orientate perpendicular pe piesa. Pentru evaluarea piesei se foloseste o bobina rotitoare.
- Bobine de suprafata - folosite la testarea pieselor cu modificari de grosime.
- Bobine speciale - folosite ca traductoare aplicate pe piese luand o forma adecvata pentru o buna mulare sau la controlul pieselor in cursul prelucrării la temperaturi ridicate de pana la 1100°C.

Defectosopia cu bobine de trecere exterioare

Controlul cu bobine de trecere se foloseste in cazul pieselor in general de revolutie, deoarece bobina imbraca piesa. Se folosesc bobine de inductie directa sau mutuala. Cel mai frecvent se utilizeaza montajul absolut si montajul diferential. (fig 4).

Montajul diferential permite autocomparatia rezultatelor obtinute in zone limitrofe ale piesei. Metoda semnalizeaza doar prezenta discontinuitatilor si a neomogenitatilor structurale. Pentru ca fisurile de mare extindere sa poate fi identificate pe baza variatiei de adancime, cele doua bobine de masura functioneaza cu un defazaj de 180. Piesa este asezata concentric cu bobina secundara, iar baleajul pe lungime este realizat cu viteza constanta, de regula prin miscarea piesei.

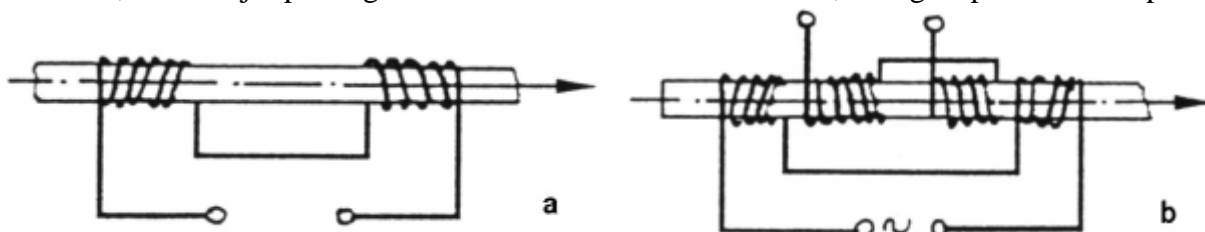


Fig.5 Schemele bobinei de trecere

a - in montaj absolut; b - in montaj diferential

Rezultatul masuratorilor este influentat de proprietatile materialului, dimensiunile corpului de controlat, dimensiunile bobinei si numarul de spire. Diametrul bobinei se alege astfel incat factorul de umplere sa fie cat mai mare (piesa sa umple complet bobina).

Pentru controlul unei piese la temperaturi mai ridicate se folosesc asa-numitele bobine la cald pana la 350⁰ C sau bobine la temperaturi inalte pana la 1100 °C. Bobina se raceste cu apa iar spirele sunt inglobate in metal pentru o evacuare mai buna a caldurii.

Idea de baza a teoriei bobinelor de trecere, care sta la baza principiului de functionare a aparatelor cu curenti turbionari, este aceea ca la parametri constanti ai bobinelor si la o frecventa constanta a campului magnetic, fiecarei valori a diametrului piesei si a conductivitatii electrice ii corespund puncte bine determinate in planul complex al tensiunilor electromotoare reduse. Reproducandu-se cu ajutorul unui sistem de masura planul complex pe ecranul oscilografului, pe baza pozitiei spotului luminos, se poate determina, fie diametrul pieselor in cazul aparatelor de control dimensional, fie conductivitatea electrica, in cazul aparatelor de comparare a structurilor si de sortare, respectiv discontinuitatile din material in cazul defectoscoapelor. Pentru a asigura concludenta necesara determinarilor, directiile de variatie din planul complex sub influenta factorilor analizati trebuie sa difere cat mai mult posibil, unghiul dintre ele trebuie sa fie de 90° sau 270°, oricum sa depaseasca 45°. Pentru a obtine unghiuri mari, la materialele neferomagnetice avem nevoie de frecvente relativ mari. La materialele feromagnetice insa nu este posibila o separare a celor doi factori si deci vom avea unghiuri mai mici.

Posibilitatea separarii efectelor in planul complex al impedantei reprodus de planul osciloscopului, in principal a variatiei permeabilitatii si conductivitatii, permit evaluarea cantitativa a defectelor de suprafata, mai ales a fisurilor. Pe baza legii similitudinii la frecvente relative constante, defectele identice ca adancime si latime produc aceleasi efecte electromagnetice, aceleasi modificari ale permeabilitatii efective.

Defectoscoopia cu bobine interioare

Examinarea pieselor (tevi, virole) (fig. 6) cu bobine interioare are la baza aceleasi principii ca si in cazul bobinelor de trecere exterioare. La acest tip de bobine este posibila o buna separare a influentei factorilor perturbatori intr-un domeniu foarte larg al valorilor f/f_1 unde f_1 este frecventa limita iar f este frecventa de lucru. Acest lucru confera metodei aproape independenta de frecventa. Sensibilitatea maxima se obtine si in acest caz la valori mari ale componentei imaginare a permeabilitatii, intervalul optim fiind considerat $f/f_1 = 1,5 - 12$.

Se precizează că în acest caz factorul de umplere este:

$$\eta = \left(\frac{d_{ib}}{D_i} \right)^2$$

unde d_{ib} - diametrul interior al bobinei; D_i - diametrul interior al piesei.

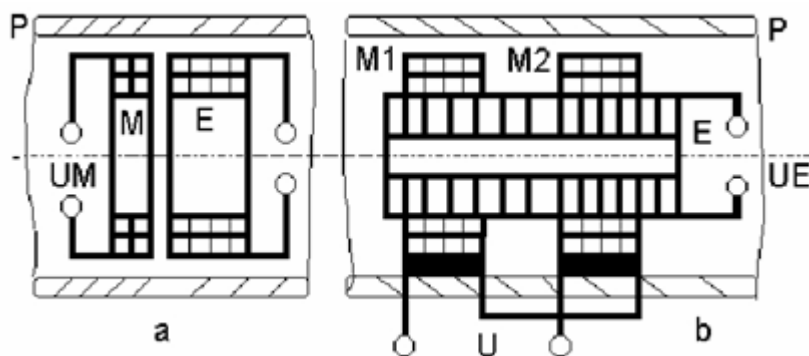


Fig.6. Scheme de control cu traductoare - bobine interioare
a - montaj absolut ; b - montaj diferential

Bobinele de interior trebuie sa asigure un coeficient de umplere cat mai mare posibil pentru ca intreg campul bobinei sa patrunda in piesa. Bobinele se introduc cu aer comprimat si se retrag cu viteza constanta prin intermediul unui pistol. Si aici cand bobina de interior ajunge in apropierea capatului tevii sau gaurii apare efectul de margine. Pentru a suprima sau reduce aceasta influenta se foloseste un corp feromagnetic in bobina care concentreaza fluxul magnetic si il conduce direct in piesa.

Printre aplicatiile cu acest tip de bobine se numara inspectia suprafetelor interioare la tevi cu nervuri sau aripi, tevi cu pereti foarte grosi sau gauri in piese mari, tevi inaccesibile montate in condensatoare, schimbatoare de caldura. Recent au inceput sa se foloseasca bobine de palpare si pentru controlul interior al tevilor. La diametre mai mari de teava, bobina de interior se roteste in jurul axei tevii si exploreaza astfel in timpul deplasarii suprafata interioara a tevii dupa o spirala. La diametre mici, teava se roteste in jurul axei longitudinale proprii, iar bobina de palpare sta nemiscata. Centrarea bobinei de interior se face la diametre mici de teava cu perii, iar la diametre mari cu role de ghidaj.

O varianta deosebita este prezentata in figura 7. Bobina primara sau bobinele interioare de excitație P, transmit prin piesă (țeavă) PC, perpendicular pe suprafață câmpul magnetic, care induce curenți turbionari. Dacă în zona examinată se află vreo discontinuitate, câmpul curenților turbionari este micșorat față de o situație în care în zona examinată nu s-ar afla vreun defect. Cu ajutorul unei sonde rotitoare exterioare S se înregistrează orice variație a intensității câmpului magnetic. Amplitudinea semnalului de defect este independentă de poziția sau lățimea defectului. Testări realizate asupra tecilor de combustibil pentru reactori nucleari, au relevat corelația liniară dintre amplitudinea semnalului și adâncimea discontinuității, constituită din orificii artificiale cu diametrul de 0,1 mm.

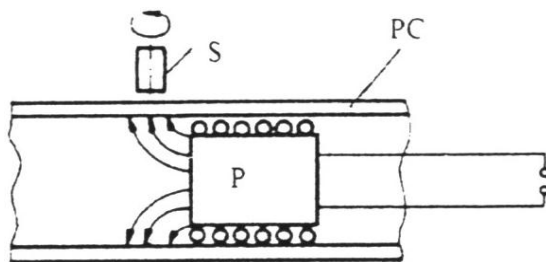


Fig. 7 Traductor de transmisie cu bobină interioară și sondă rotitoare exterioară

Defectosopia cu bobine - sonde aplicate

Controlul cu bobină aplicată sau de proximitate, figura 8, se bazează pe inducerea curentului turbionar în piesa de controlat prin apropierea sau contactul unei bobine străbătute de curent alternativ. Schema de control cu bobină circulară din figura 8.a, se folosește, atât pentru detectarea fisurii, cât și pentru stabilirea direcției fisurii, iar cea din figura 8,c cu predilecție în defectosopia îmbinărilor sudate de revoluție.

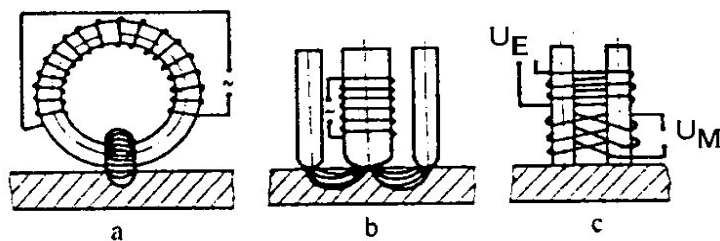


Fig.8 Scheme de control cu bobine-sonde aplicate:
a - sondă cu bobină toroidală; b - sondă cu bobină focalizată;
c - sondă cu bobine diferențiale

Exista montaje pentru masurari absolute sau diferentiale. Fig. 9.

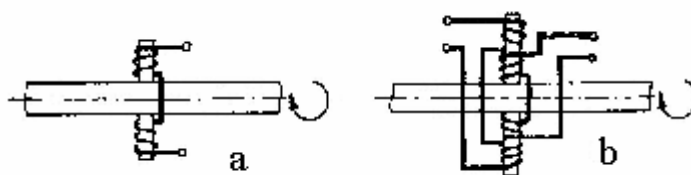


Fig.9. Schema electrică a sondei pentru controlul pieselor cilindrice:
a - bobine în legătură absolută; b - bobine în legătură diferențială

Sonda absoluta este formata din doua bobine identice, aflate in interiorul infasurarilor primare si secundare. Infasurarile primare alimentate in curent alternativ sunt legate in serie si in opozitie, astfel incat campurile magnetice alternative sa fie egale ca valoare si de sens opus. Fig. 10

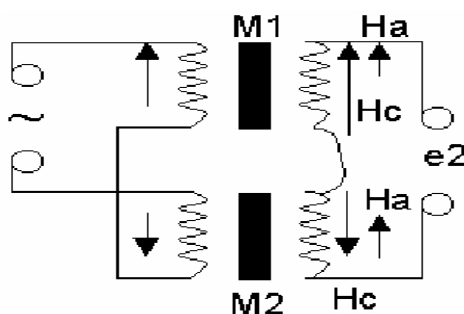


Fig. 10. Schema electrica a sondei pentru masurari absolute

Sonda diferentiala se obtine din sonda absoluta prin inserierea aditionala a infasurarilor primare si inserierea in opozitie a infasurarilor secundare, astfel incat campurile alternative ale infasurarilor primare ajung orientate in acelasi sens, iat cele secundare in opozitie. (fig 11.)

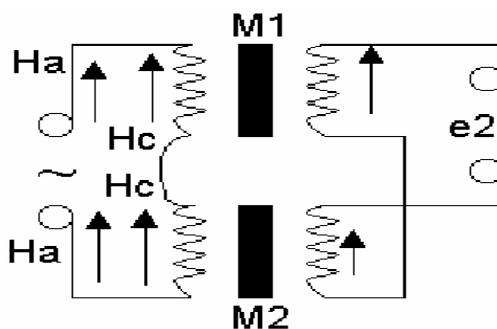


Fig.11 Schema electrica a sondei pentru masurari diferentiale

Defectosopia cu bobina de contact cu sonda hall

Traductorul de contact cu bobina inelara si sonda Hall, functioneaza pe urmatorul principiu: bobina P produce in intrefier campul magnetic H_0 , dirijat in lungul axei sale. (fig 12). Acest camp, induce in piesa de contact PC curenti turbionari avand campul magnetic propriu de intensitate H_p . Campul rezultat $H_0 - H_p$, sau componenta normala a acestuia traverseaza placa conductoare a sondei Hall, care reactioneaza fata de amplitudinea campului magnetic $\Delta H = H_0 - H_p$ si fata de directia acestuia. In prezenta campului magnetic perpendicular liniile de curent introduse in lungul placutei semiconductoare sunt deviate transversal determinand aparitia unor diferente de tensiune u_H . Marimea u_H este proportionala cu constanta Hall si cu inductia B_p a campului magnetic.

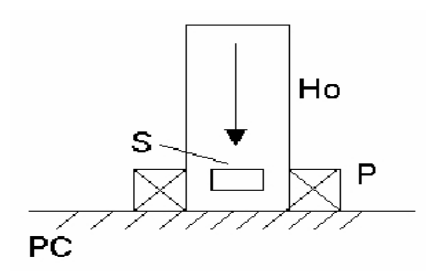


Fig. 12. Traductor de contact cu bobina circulara si sonda Hall

Datorita insensibilitatii generatorului Hall fata de frecventa, spectrul de functionare al traductorului poate fi foarte larg, intre 20Hz si 200kHz. Pe de alta parte, datorita dimensiunilor miniaturale ale sondei Hall, masurarea nu este practic influentata de efectul de lift-off (miscare inversa care poate provoca indicatii false) sau de coeficientul de umplere. Traductorul poate fi construit cu doua sonde Hall, astfel putandu-se compara informatii culese din zone limitrofe ale campului de curenti turbionari indusi.

Defectoscopia cu bobine de transmisie

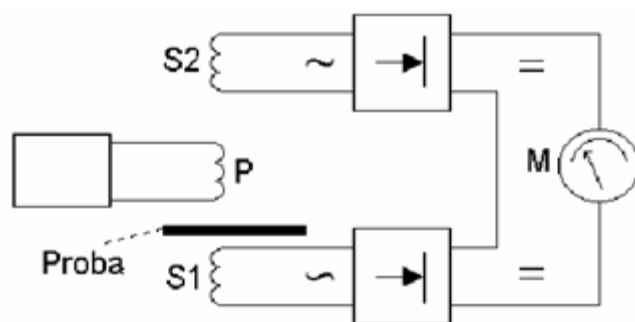


Fig. 13. Traductor cu bobine de transmisie

De o parte a piesei la distanta a si perpendicular se afla bobina primara P, care produce curenti turbionari in piesa. De cealalta parte la distanta b si de asemenea perpendicular este situata bobina secundara S1 de masurare a diferentei de tensiune intr-un montaj diferential cu bobina secundara S2. Campul magnetic al curentilor turbionari, transmitandu-se prin proba de controlat, provoaca o variatie de tensiune in functie de prezenta sau absenta defectelor din zona de actionare a curentilor turbionari indusi de bobina primara.

Recomandari privind alegerea parametrilor de control

Fazele examinarii cu curenti turbionari sunt urmatoarele:

- alegerea sistemului de bobine;
- calibrarea in functie de factorii de influenta doriti;
- desfasurarea controlului;
- evaluarea si interpretarea semnalului.

Frecventa de lucru este stabilita in functie de materialul piesei controlate, forma acesteia, caracteristicile sistemului de control si ale corpului de reglare - etalonare.

La alegerea sistemului de bobine se vor lua in considerare posibilitatile de compensare a semnalelor perturbatoare oferite de bobinele diferentiale, de asemenea faptul ca aceste semnale sunt, cu atat mai eficient suprimate, cu cat lungimea bobinei este mai mare. Coeficientul de umplere trebuie sa fie si el intre 0.5 si 0.9.

Frecventa de control se alege luand in considerare: separarea influentei adancimii defectului, raportul dintre indicatiile interioare si exterioare ale discontinuitatii, marimea defazajului dintre semnale in functie de influenta factorilor perturbatori.

Sensibilitatea controlului se determina cu ajutorul unei piese de comparatie de acelasi fel si marime ca si piesa controlata. Se folosesc defecte artificiale, cat mai apropiate ca forma si dimensiuni de cele naturale.

Pentru reprimarea semnalelor perturbatoare, la piesele feromagnetice se folosește magnetizarea de saturatie.

Distanța de așezare între bobina de excitație și bobina de măsurare are o mare importanță, deoarece lățimea câmpului de acțiune electromagnetică se micșorează pe măsura măririi frecvenței. Astfel, la frecvențe de 10 - 20kHz, coeficientul de mărire relativă a câmpului de acțiune este cuprins între 1.2 și 1.5. La frecvențe de peste 50kHz nu se mai produc modificări. De asemenea lățimea câmpului de acțiune este influențată de spațiul dintre piesă și bobina, în sensul că pe măsura măririi acesteia lățimea de acțiune scade.

Etalonarea defectoscopului

Etalonarea defectoscopului urmărește asigurarea condițiilor optime de control, reglarea parametrilor în vederea obținerii unui raport maxim semnal util/semnal perturbator (zgomot). Operația este obligatorie înainte de începerea controlului.

Dacă obiectul controlat este o teavă, corpul de etalonare reprezintă un tronson de teavă cu același diametru, grosime de perete și material, stare de prelucrare a suprafeței și tratament aplicat. Corpurile de etalonare sunt de două feluri: cu orificii și cu creștături - renuri.

Corpurile de etalonare cu orificii sunt și ele de două feluri: cu orificii străpunse utilizate la controlul țevilor subțiri și cu orificii nestrapunse utilizate la controlul țevilor groase. Pe corpul de etalonare se află trei orificii decalate la 120° așezate axial astfel încât semnalele recepționate să fie distincte și neinfluențate prin efect de margine. Diametrele orificiilor sunt în funcție de diametrul exterior al țevilor. Adâncimea recomandată la orificiile nestrapunse este de 0.2s sau 0.4s, s fiind grosimea țevii.

Corpurile de etalonare cu renuri au renurile frezate la adâncimea de 0.2s în cazul țevilor sudate, trase sau laminate la rece, și de 0.4s la țevile sudate, laminate la cald. Lățimea este de 1mm iar lungimea renurilor se ia egală cu lățimea îmbinării.

Corpul de etalonare se trece prin bobina defectoscopului, determinându-se mărimea indicației de defect de la orificiile sau creștăturile practicate. Indicațiile corpului de la etalonare nu pot însă servi la aprecierea mărimii defectelor din piesele controlate.

Sensibilitatea examinării cu curenți turbionari este foarte ridicată, lățimea minimă a fisurii putând fi și de ordinul micronilor. Chiar la materiale cu conductivitate electrică foarte mică, cum ar fi fibrele de carbon sintetic, se asigură o sensibilitate absolută la fisuri până la lățimi de 0.2mm.

Limitări ale testării cu curenți turbionari

- Aplicabilă numai la materialele cu bune calități conductoare (metale, aliaje de materiale ce conțin în compoziție straturi de material conductor). Se pot măsura grosimile unor straturi neconductoare cu condiția ca acestea să fie depuse pe straturi de materiale conductoare;
- Metoda poate detecta doar acele defecte ce perturbă liniile de curgere a curenților turbionari. Așadar, vor putea fi detectate numai defectele orientate perpendicular pe aceste linii nu și cele orientate paralel (tangențial) la liniile de curent.

